

Značaj ispitivanja radiofrekventnih polja u obrazovanju studenata

Kristina Spasić¹, Jovana Janjušević², Doc dr Dejan Spasić³

Rezime: U ovom radu razmatra se značaj ispitivanja radiofrekventnih (RF) polja u obrazovanju studenata prirodno-tehničkih nauka. Korišćenjem Monte Karlo simulacija modelirano je kretanje elektrona pod uticajem elektromagnetnog zračenja, čime se studentima pruža prilika da razumeju osnovne principe fizike plazme i RF interakcija sa materijom. Poseban akcenat stavljen je na primene RF tehnologija u kontekstu obnovljivih izvora energije, poput kontrolisane nuklearne fuzije i mikrotalasnih reaktora. Prikazana je i važnost obrazovanja u ovoj oblasti kao ključne komponente za razvoj održivih energetske rešenja. Rad naglašava interdisciplinarni karakter obrazovanja, ulogu laboratorijskih vežbi u razvoju praktičnih veština, kao i značaj bezbednosnih aspekata prilikom rukovanja RF izvorima. Kroz sticanje ovih znanja i veština, studenti se osposobljavaju za aktivno učešće u globalnoj energetske tranziciji.

Ključne reči: Novi izvori energije, Radiofrekventna polja, Monte Karlo simulacija, Putanja elektrona, Edukacija studenata

The Role of Radiofrequency Field Research in the Education of Students

Abstract: This paper explores the importance of research on radiofrequency (RF) fields in the education of students in the natural and technical sciences. Using Monte Carlo simulations, electron trajectories under the influence of electromagnetic radiation are modeled, offering students a comprehensive understanding of plasma physics and RF-matter interactions. Special attention is given to the application of RF technologies in the context of renewable energy sources, such as controlled nuclear fusion and microwave reactors. The paper highlights the importance of education in this field as a crucial component for the development of sustainable energy solutions. It emphasizes the interdisciplinary nature of RF education, the role of laboratory exercises in developing practical skills, and the significance of safety protocols when working with RF sources. By acquiring this knowledge and skill set, students are empowered to contribute meaningfully to the ongoing global energy transition.

Key words: Renewable Energy Sources, Radiofrequency Fields, Monte Carlo Simulation, Electron Trajectory, Student education

¹ Student 4. godine OAS, Fakultet za fizičku hemiju, Univerzitet u Beogradu, Studentski trg 12-16, 11300 Beograd, 20210001@student.ffh.bg.ac.rs

² Mr.ing, Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu, Đušina 7, 11300 Beograd, r705-23@dok.rgf.bg.ac.rs

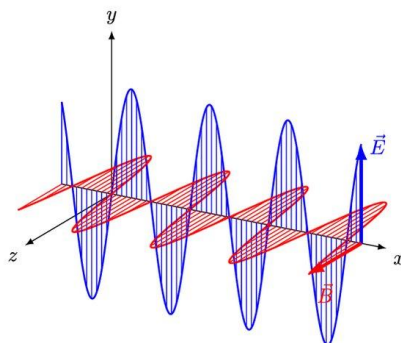
³ Doc dr, Fakultet primenjenih nauka Niš, Univerzitet Privredna akademija Novi Sad, welspad@yahoo.com

1. UVOD

Svakodnevnom izloženošću radiofrekventnih polja zahteva dublje razumevanje ovog fenomena u vidu širenja svesti kako ona može pozitivno da se iskoristi u primeni za obnovljive izvore energije. Na primer, u tehnologijama poput plazme i hladne fuzije, radiofrekventno polje može imati značajnu ulogu u usmerevanju čestica potrebnih za započinjanje fuzijskih reakcija. S time da je hladna fuzija i dalje u fazi istraživanja i još nije široko prihvaćena kao održiv izvor energije, ali ovakva upotreba RF polja pruža potencijalne tehnološke inovacije. Osim ovog primera postoje i mnogi drugi kao što nuklearni magnetni rezonatori (NMR), maseni spektrometar (MAS), mikrotalasni reaktori, Microwave Ovens in Laboratory (Laboratorijski mikrotalasni uređaji), i mnogi drugi. Odavde možemo da zaključimo da kroz obrazovanje studenta vezano za radiofrekventna polja, osim terojskog upoznavanje već i praktičnog rada sa njim, stiču ogromno iskustvo koje kasnije mogu da primene za unapređivanje uređaja tako da se što manje upotrebljavaju fosilna goriva.

2. RADIOFREKVENTNO POLJE

Elektromagnetno zračenje je složeno, jer ima talasne i čestične osobine. Ako elektromagnetno zračenje posmatramo kao talas prema Maksvelu predstavljau transversalne talase koji imaju oscilujujuće električno i magnetno polje, tako da su ova polja osciluju u pravcima normalnim jedno na drugo.



Slika 1- Prikaz prostiranja elektromagnetnog talasa, na slici polje E osciluje duž y -ose, dok polje B osciluje duž z -ose.

$$E_z = A \sin(2\pi vt - kx)$$

$$B_x = A \sin(2\pi vt - kx)$$

Odavde se zaključuje da talasi osciluju sinusoidno sa jednakim maksimalnim amplitudama A , jednakom frekvencijom ν i jednakom fazom ($k = (2\pi/\lambda)$). Takođe talas koji je dat kao primer jeste ravno polarizovan, što pokazuje da se vektori električnog i magnetnog polja ne menjaju pravac u toku oscilovanja.

Čestična osobine se posmatra preko fotona, preko kvantnog stanovištase posmatra kao tok kvanata. Energija jednog kvanta preko Plankove jednačine:

$$E = h\nu$$

h - Plankova konstanta

v- frekvencija

Radiofrekventna polja su deo elektromagnetnog zračenja čija frekvencija ide između 3 kHz i 300 GHz. Ukoliko prebismo u talasnu dužinu koristeći:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

λ – talasna dužina (uglavnom se izražava u nm)

c – brzina svetlosti (300000km/s)

f – frekvencija (izražava se u Hz)

Radiofrekventno polje na materiju utiče tako da indukuje vibracije i rotacije molekula, čime se dolazi do njenog zagrevanja putem dielektričnog gubitka. Osim toga RF polje se koristi za spektroskopiju, to jest za indentifikaciju i kvantifikaciju molekula, poput tehnike NMR.

Iako radiofrekventno zračenje nije jonizujuće, ukoliko dođe do visokog izlaganja može doći do pojave termalnih efekata, čime može uticati na biološke sisteme. Odavde možemo da zaključimo da je veoma bitno pridržavati se mera bezbednosti, prilikom rukovanja sa uređajima koji emituju radiofrekventno zračenje.

3. RADIOFREKVENTNO ZRAČENJE PRIMENA U SIMULACIJI MONTE KARLO KODA

Uz pomoć Monte Karlo koda izvedena je simulacija kretanja elektrona u radiofrekventnom polju, koji se oslobađa sa površine elektroda pri određenim vrednostima kinetičke energije u pravcu električnog polja. Diferencijalna jednačina kretanja elektrona je data kao:

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = e \left(E(t) = \frac{dr}{dt} \times B(t) \right)$$

r - radijus vektor elektrona

m - masa elektrona

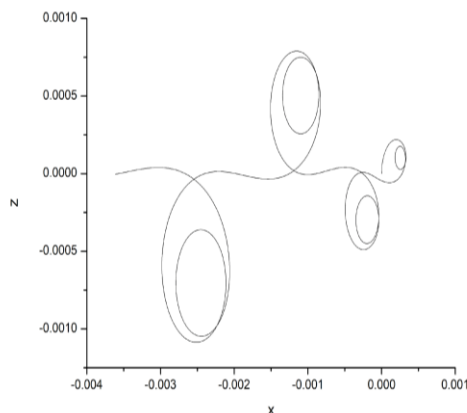
e – naelektrisanje elektrona

Vektori periodično osciluju određenom frekvencijom na način opisan jednačinama:

$$\vec{E}(t) = \sqrt{2} E_R \cos(2\pi f t) \vec{k},$$

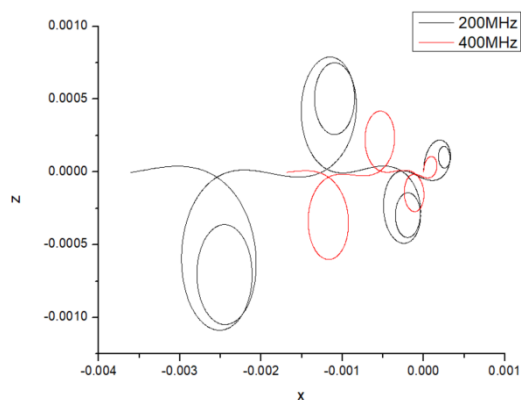
$$\vec{B}(t) = \sqrt{2} B_R \sin(2\pi f t) \vec{j}.$$

U datim jednačinama $\vec{j}$ i $\vec{k}$ su jedinični vektori u Dekartovom koordinatnom sistemu I govore o pravcu električnog i magnetnog polja, a f predstavlja frekvenciju oscilovanja električnog polja. Da bi se jednačina rešila koristi se numerička integracija Runge – Kuta metod, odakle se dalje dobijaju koordinate elektrona, koje se čuvaju memoriji računara, dalje se ubacuju u *Origin* odakle se dobijaju putanje elektrona. Korišćene vrednosti redukovano električnog $E/N=200$ Td ($Td=10^{-21} \text{ Vm}^2$) i redukovano magnetnog polja $B/N=1000$ Hx ($Hx=10^{-20} \text{ Tm}^2$). Za opisivanje pravaca kretanja elektrona korišćeni su uglovi sfernog koordinatnog Sistema. Zenitni ugao θ , definiše pravac duž z-ose I predstavlja ugao brzine v i azimutni ugao ϕ koji definiše pravac duž x-ose.



Slika 2 - Putanja elektrona u pravcu električnog polja iz stanja mirovanja, $E_k=0$ eV. Elektron se kreće duž z-ose (ϕ i θ su jednaki nuli). Redukovano električno polje je $E/N=200$ Td, redukovano magnetno polje je $B/N=1000$ Hz, frekvencija 200 MHz.

Ukoliko se promeni frekvencija oscilovanja, mogu da se uoče razlike u putanji kada je radiofrekventno polje učestalosti od 200 Hz, crna putanja elektrona, dok kada je radiofrekventno polje učestalosti od 400 Hz, crvena putanja. Sa slike se vidi da je crvena putanja dosta kraća od crne. Pritom, za vreme od jednog poluperioda crna putanja uspeva da napravi po dve petlje, dok crvena uspeva samo po jednu petlju. Putanje imaju sličan oblik.



Slika 3 – Uticaj frekvencije na oblik putnje elektrona. Elektron je pušten bez početne energije. Redukovano električno polje je $E/N=200$ Td, redukovano magnetno polje je $B/N=1000$ Hz.

4. PRIMENA RADIOFREKVENTNOG POLJA U EDUKACIJI

Obrazovanje u oblasti radiofrekventnih (RF) polja ima sve veći značaj u kontekstu energetske tranzicije i prelaska sa fosilnih goriva na održive izvore energije. Kroz teorijsko i praktično izučavanje elektromagnetnog zračenja, studenti ne samo da razumeju osnovne fizičke procese već se i osposobljavaju za rad u interdisciplinarnim oblastima koje su ključne za razvoj energetskih tehnologija budućnosti.

Laboratorijska ispitivanja i simulacije kretanja elektrona u RF poljima, kao što je Monte Karlo simulacija opisana u ovom radu, omogućavaju studentima da analiziraju ponašanje naelektrisanih čestica u kompleksnim poljima. Ovo znanje je od izuzetne važnosti za razumevanje i dalji razvoj uređaja za kontrolisanu nuklearnu fuziju, kao što su tokamaci i stelaratori. U tim sistemima RF talasi se koriste za grejanje i usmeravanje plazme, što je ključni korak ka ostvarenju stabilne i samoodržive fuzije — potencijalnog izvora energije sa minimalnim negativnim uticajem na životnu sredinu.

Pored toga, RF tehnologije se primenjuju u širokom spektru oblasti, uključujući proizvodnju vodonika korišćenjem mikrotalasnih reaktora, obradu materijala plazmom, RF identifikaciju i prenos energije na daljinu. Razumevanje ovih procesa u ranoj fazi obrazovanja omogućava studentima da budu konkurentni u savremenim istraživačkim i industrijskim centrima, gde se RF sistemi integrišu u nove generacije energetski efikasnih uređaja.

Takođe, studentima se kroz ovakve laboratorijske vežbe i simulacije razvija svest o energetskej efikasnosti, reciklaži energije i smanjenju energetskih gubitaka. Na primer, eksperimentisanjem sa promenom frekvencije RF polja i posmatranjem razlika u putanjama čestica, studenti direktno sagledavaju kako male promene u parametrima mogu imati veliki uticaj na krajnji rezultat sistema — što je analogno optimizaciji realnih energetskih sistema.

Osim toga, važan aspekt obrazovanja u oblasti RF tehnologije jeste razvijanje odgovornosti prema bezbednosti i zaštiti životne sredine. Učenjem o mogućim termalnim efektima i bezbednosnim merama koje se moraju poštovati pri radu sa RF izvorima, studenti se uče pravilnom i odgovornom rukovanju opremom koja može imati snažan uticaj na biološke sisteme.

Kombinacijom teorijskog znanja, praktičnih eksperimenata, upotrebe naprednih softverskih alata (poput Origin-a i programskih okruženja za numeričku integraciju) i usvajanja bezbednosnih standarda, studenti se osposobljavaju za realan doprinos energetskej tranziciji. Njihovo obrazovanje ne ostaje u granicama klasičnih nastavnih sadržaja, već postaje temelj za aktivno učestvovanje u razvoju tehnologija koje će obeležiti energetski pejzaž narednih decenija. Na taj način, obrazovanje studenata u oblasti RF polja ne predstavlja samo naučno-tehničku obuku, već stratešku investiciju u budućnost održive energije, naučne izvrsnosti i ekološke odgovornosti.

5. ZAKLJUČAK

Razumevanje radiofrekventnih polja i njihova primena u obrazovanju studenata predstavlja važan korak ka pripremi nove generacije stručnjaka za izazove energetske tranzicije. Kroz teorijsko učenje, laboratorijska ispitivanja i numeričke simulacije, studenti ne samo da stiču znanje o složenim elektromagnetnim fenomenima, već razvijaju i veštine potrebne za praktičnu primenu u oblastima kao što su kontrolisana nuklearna fuzija, proizvodnja vodonika i napredni energetski sistemi. Pored toga, kroz rad sa RF izvorima razvija se svest o bezbednosti i odgovornom korišćenju tehnologije. Obrazovanje u ovoj oblasti time postaje ne samo naučna obuka, već i ključna komponenta razvoja održivih tehnoloških rešenja i odgovorne energetske budućnosti.

6. LITERATURA

- [1] A. Bojarov, M. Radmilović – Radenović, M. Savić, *Uticaj sekundarne emisije elektrona na karakteristike radio-frekvantnih plazmi* (naučni rad), Institut za fiziku, Beograd, 2011.
- [2] J. Radić-Perić, *Savremeni pravci istraživanja u hemiji plazme* (doktorske studije), 2018.
- [3] J. Miller, *Damped Motion of a Charged Particle in Time Varying Electromagnetic Fields* (naučni rad), 2019.
- [4] M. Riatić, V. Stanković, M. Vojnović, G. Poparić, *Physics of Plasmas*, 29(9), 093512, 2022.
- [5] Srpska akademija nauka i umetnosti, *Mlazevi slobodnih elektrona*, Zavod za udžbenike, Beograd (knjiga), 1997.
- [6] H. Serrano, *Visualizing the Runge-Kutta Method*, <https://www.haroldserrano.com/blog/visualizing-the-runge-kutta-method>, 2016.
- [7] <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5913606/course/section/6090129/Chen.pdf>